

# **Lichtbogenschweißen von Titanlegierungen – Einfluss von Impfmitteln auf das Schweißgefüge von TiAl6V4**

*D. Langen, M. A. Swider, T. Hassel*

*Institut für Werkstoffkunde*

*langen@iw.uni-hannover.de*

---

## **Abstract**

Die sehr gute Korrosionsbeständigkeit und hohe spezifische Festigkeit - auch bei höheren Temperaturen - prädestinieren Titan und Titanlegierungen u.a. als Werkstoffe für die Anwendung in hochbeanspruchten Flugtriebwerkskomponenten. Aus der Motivation, entsprechende Hochleistungsbauteile durch ressourcenschonende und effiziente Aufbereitungstechnologien, dem Lebenszyklus komplexer Investitionsgüter erneut zuzuführen, ergeben sich besondere Anforderungen bei der schweißtechnischen Regeneration.

Am Institut für Werkstoffkunde der Leibniz Universität Hannover konnten durch eine gezielte Einstellung der Schweißatmosphäre Proben technisch reinen Titans (Grade 2-4) gefügt und im Bereich der Schmelzzone definiert aufgelegt werden. In Untersuchungen zur Beeinflussung der Gefügestruktur in der Schweißzone konnte durch Impfprozesse die Erstarrungsdynamik gezielt verändert werden. Das „Überschweißen“ aufgebrachtener Impfmittelschichten führte zu Umbildungsprozessen, die zur Steuerung des Gefügaufbaus genutzt werden können. Weiter konnten flussmittelähnliche Effekte der Zusätze beobachtet werden, sodass ebenfalls die Einschweißtiefe durch eine Impfbehandlung variiert werden konnte.

Mit der Übertragung der gewonnenen Ergebnisse auf die Titanlegierung TiAl6V4 soll ein Beitrag zur schweißtechnischen Regeneration von Titanbauteilen in Triebwerkskomponenten durch Auftrag- oder Verbindungsschweißungen mit optimierter Gefügestruktur und damit verbesserten mechanischen Eigenschaften geleistet werden.

---

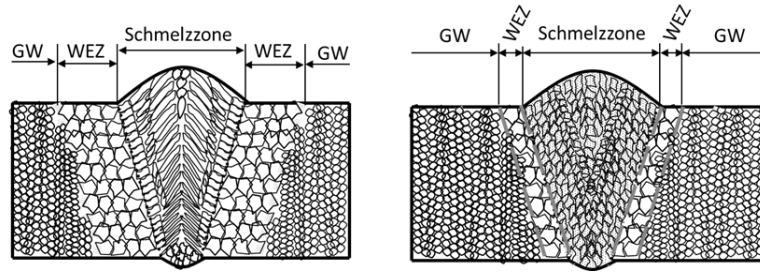
## 1 Einleitung

Mit der Forderung nach effizienten und ressourcenschonenden Technologien für die schweißtechnische Aufarbeitung komplexer Triebwerkskomponenten in der Luftfahrtindustrie kommen auch weniger verbreitete, moderne lichtbogenbasierte Schweißverfahren bei der Bauteilregeneration in Betracht. Die etablierten strahlbasierten Schweißverfahren überzeugen bei der Regeneration von Titanbasiswerkstoffen zwar im Hinblick auf das Reparaturergebnis, sind jedoch wie beispielsweise das Vakuum-Elektronenstrahlschweißen mit sehr hohen Investitions- und Fertigungskosten verbunden. So können am Ende die Reparaturkosten bis zu 65 % des Neuteilpreises ausmachen [1].

Das Eigenschaftsprofil von mittels Lichtbogentechnologie hergestellten, stoffschlüssigen Verbindungen unterscheidet sich insofern, dass sich durch den weniger lokal begrenzten Energieeintrag der Bereich der strukturellen Werkstoffbeeinflussung in Schmelz- und Wärmeeinflusszone deutlich ausgeprägter darstellt. Die Schmelzzone (SZ) zeichnet sich dabei durch ein meist zur Schweißnahtmitte ausgerichtetes Erstarrungsgefüge aus, häufig verbunden mit einem sog. Overmatching der Materialeigenschaften [2]. In der Wärmeeinflusszone (WEZ) führen eingeleitete Rekristallisationsprozesse zu einer Kornvergrößerung, was zu einer Verschlechterung der mechanischen Eigenschaften führt [3].

Konzepte zur Optimierung der Gefügestruktur durch oszillierende [4] bzw. gepulste Schweißlichtbögen [5] oder durch die Zugabe von „Microcoolern“ in die Schmelze [6] stellen sich als nur sehr eingeschränkt geeignet dar. Nach [7] erscheint die Beeinflussung der Mikrostruktur durch eine Schmelzebehandlung mit Monoboriden vielversprechend, ein eindeutiger Nachweis konnte jedoch nicht erbracht werden.

Ziel dieser Arbeit ist durch die Anwendung moderner, energiereduzierter Lichtbogenschweißverfahren eine Minimierung der Wärmeeinflusszone zu erreichen und zugleich durch eine gezielte Schmelzebehandlung das Gefüge der SZ zu optimieren (*Abb. 1*).



*Abb. 1: Feinkörnende Gefügeumbildung und Reduktion der Wärmeeinflusszone durch Impf- und Flussmitteleffekte (links: konventionelle Schweißung; rechts: Impf- und Flussmitteleffekt)*

Den Ansatz hierfür liefern Vorarbeiten aus dem Institut für Werkstoffkunde [8] zur Beeinflussung der Gefügestruktur durch eine prozessintegrierte Impfbehandlung der Metallschmelze.

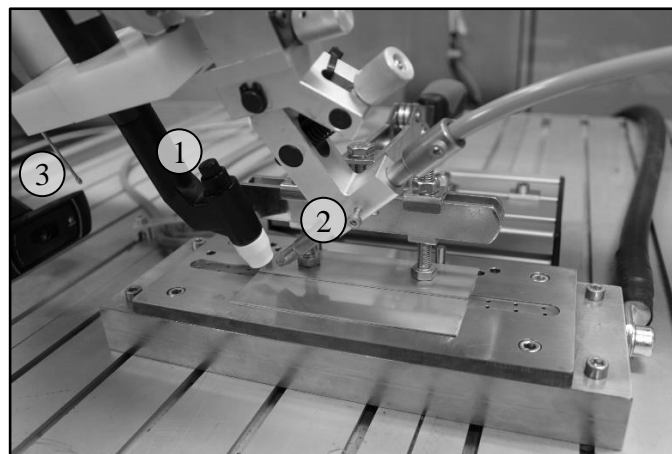
## **2 Versuchsaufbau und -durchführung**

Aus der ausgeprägten Affinität des Titans gegenüber atmosphärischen Gasen bei Temperaturen oberhalb von 350 °C ergeben sich besondere Anforderungen, die die schweißtechnische Verarbeitung unter lokaler Schutzbegasung nicht bzw. nur sehr bedingt zulassen. Bei unzureichender Kontrolle der Schweißprozessumgebung führt eine interstitielle Aufnahme von Stickstoff, Sauerstoff oder Wasserstoff im Titangitter zu einer massiven Versprödung des Materials. Aus diesem Grund wurde eine Schutzgasschweißkammer (Abb. 2) aufgebaut, in der sich definiert sehr kleine Sauerstoffpartialdrücke (< 60 ppm) einstellen lassen. Durch die Integration eines Drei-Achs NC Portals lassen sich die gängigen Lichtbogenprozesse, wie das MIG-, WIG- und Mikroplasma-Verfahren automatisiert abbilden.



*Abb. 2: Schutzgasschweißkammer mit Schleusensystem und integriertem Drei-Achs-NC-Portal*

Die Versuchsschweißungen wurden als Auftragsnaht auf TiAl6V4-Blech mittels Mikroplasmaverfahren ausgeführt (Abb. 3), dabei wurde parallel zur Walzrichtung geschweißt.



*Abb. 3: Mikroplasma-Prozessaufbau (1) mit Kaltdrahtzuführung (2) und Sauerstoffmesssonde (3)*

Die Impfbehandlung der SZ erfolgte durch direktes Überschweißen einer definiert aufgetragenen Schicht aus Fremdkeimsubstanzen. Diese wurden als acetonsche Suspension gleichmäßig aufgetragen (Abb. 4). Neben karbidischen Impfmitteln (TiC, VC) wurden gleichermaßen nitridische (TiN, CrN), boridische (BN) sowie silizidische Verbindungen aufgebracht und deren Einfluss auf das Erstarrungs- bzw. Umwandlungsverhalten untersucht.

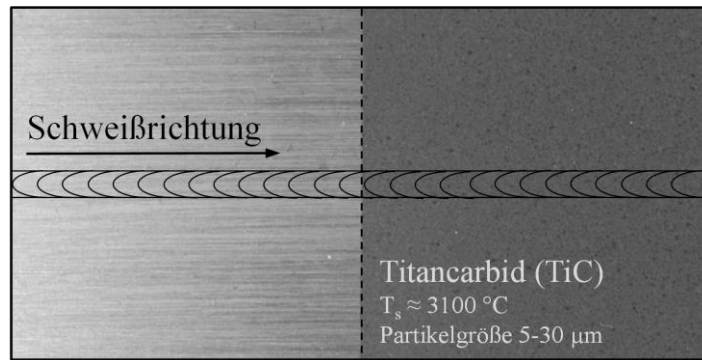


Abb. 4: Probe mit TiC-Film (rechts) und schematisch dargestellter Auftragschweißung

Der Impfmittelauftrag wurde dabei gravimetrisch bestimmt und ins Verhältnis zur beschichteten Probenoberfläche gesetzt.

Die entsprechend vorbereiteten Blechproben (Abmessung 120 mm x 68 mm) werden über das Schleusensystem in die Schweißkammer eingebracht und zur Auftragschweißung auf einer Vorrichtung ausgerichtet und fixiert. Die Schweißung erfolgt geradlinig entlang der Probenlängsachse.

Sämtliche Versuche wurden bei Restsauerstoffgehalten < 60 ppm durchgeführt.

Die Schweißparameter wurden zunächst in Referenzschweißungen an TiAl6V4-Proben (mit TiAl6V4-Zusatzdraht; Ø 1,2 mm) ohne Impfmittelauftrag ermittelt und in den anschließenden Untersuchungen unverändert beibehalten. Die entsprechenden Prozessparameter zeigt Tab. 1.

Tab. 1: Schweißparameter für Auftragschweißungen – Mikroplasma

Schweißgeschwindigkeit	Drahtvorschub	Schweißstrom	Plasmagasstrom	Brennerdistanz
in cm/min	in m/min	in A	in l/min	in mm
10	0,3	22	0,4	2,5

### 3 Versuchsergebnisse

Die Entnahme von Proben zur mechanischen und metallographischen Analyse erfolgte mittels Wasserabrasivstrahlschneiden. Dabei wurden Abschnitte der Größe 20 mm x 10 mm aus ungeimpften und geimpften Bereichen der Proben getrennt, sodass ein direkter Vergleich des Gefüges in Schmelz- und Wärmeeinflusszone möglich ist. Abb. 5 zeigt beispielhaft die Draufsicht einer Auftragschweißung im Übergangsbereich „ungeimpft-geimpft“ und den entsprechend aufgezeichneten Restsauerstoffgehalt der Schweißatmosphäre über der Versuchszeit.

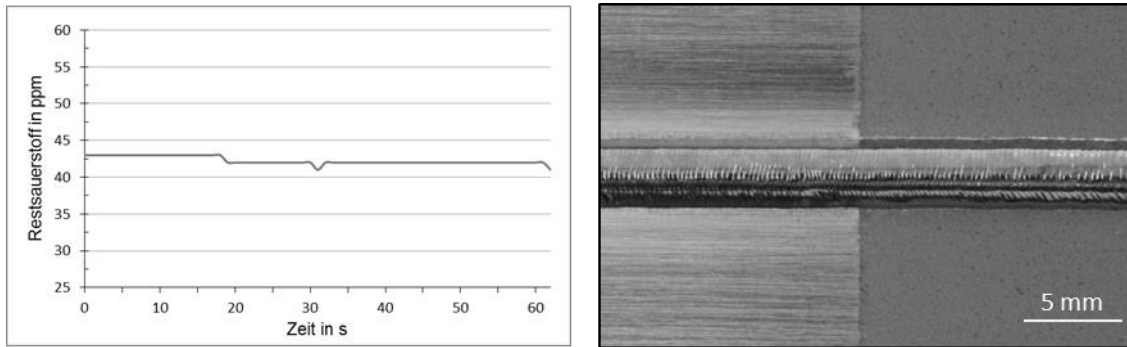


Abb. 5: Auftragschweißung auf TiAl6V4 mit artgleichem Zusatzwerkstoff, TiC-geimpft (rechts); Restsauerstoffgehalt über der Versuchszeit (links).

Die Schweißnaht verläuft sehr gleichmäßig über die gesamte Probenlänge bei gleichbleibend feiner Schuppung der Nahtoberfläche. Auch am Übergang „ungeimpft-geimpft“ zeigen sich keine signifikanten Unterschiede in der Nahtmorphologie. In allen Probenschweißungen konnte ein sehr ähnliches Verhalten beobachtet werden.

Die Präparation der Probenquerschnitte für die metallurgischen Untersuchungen erfolgte durch Schleifen, Vibrationspolieren und Ätzen (Lösung nach Kroll).

Die Beurteilung von WEZ und SZ wurde anhand von Makroaufnahmen der Schweißnähte im Querschliff vorgenommen. Abb. 6-Abb. 8 zeigen entsprechend Querschliffe einer ungeimpften sowie zweier geimpfter Auftragsnähte auf TiAl6V4 mit artgleichem Zusatzwerkstoff. Anhand der Makroaufnahmen wurden die Nahtüberhöhung sowie die Ausdehnung der Grobkornzone bestimmt.

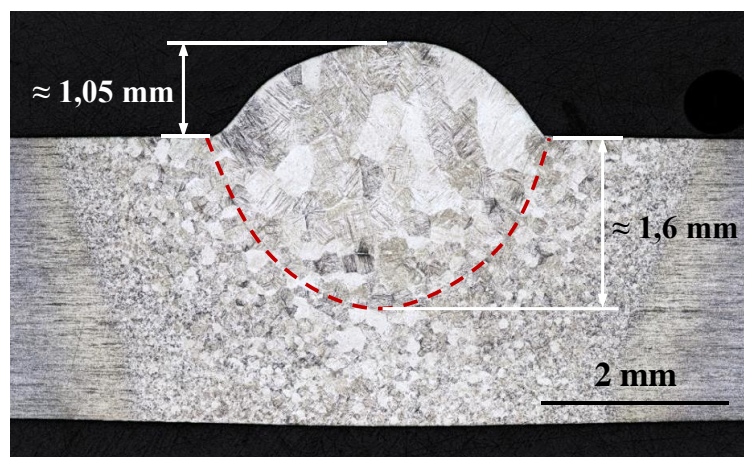


Abb. 6: Auftragschweißung im Querschliff, ungeimpft; Grobkornzone eingefasst durch Strichlinie

Die Grobkornzone der ungeimpften Schweißung (Abb. 6) ist weit in den Grundwerkstoff ausgedehnt. Der angrenzende Bereich verhältnismäßig grob rekristallisierter Körner erstreckt sich nahezu bis zur Probenunterkante.

Im Vergleich dazu zeigt die mit Vanadiumkarbid geimpfte Probe (Abb. 7) eine deutlich kleinere Zone groben Kornes. Die Breite der WEZ konnte insbesondere im unteren Probenbereich reduziert werden. Die Nahtüberhöhung ist um etwa 20 % gesteigert.

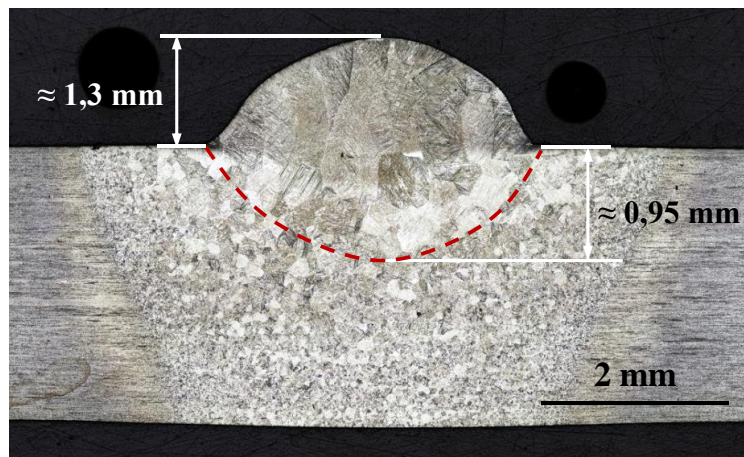


Abb. 7: Auftragschweißung im Querschliff, VC-geimpft

Am deutlichsten stellt sich der Impfeffekt an der mit Titankarbid behandelten Auftragsnaht dar (Abb. 8). Hier konnte der Grobkornbereich weiter eingeschränkt werden. Der Bereich rekristallisierten Kornes in der WEZ sowie die Nahtüberhöhung zeigt im Vergleich zur Vanadiumkarbid-geimpften Naht jedoch keine auffälligen Unterschiede.

Es kann festgestellt werden, dass an allen untersuchten und impfbehandelten Auftragsnähten ein flussmittelähnlicher Effekt auftritt. Insbesondere äußert sich dieser in einer deutlichen Einschränkung der Schmelzzone, gekennzeichnet durch die grobe Primärkornstruktur. Die WEZ konnte durch die Impfbehandlung ebenfalls geringfügig reduziert werden. Ein in der Literatur beschriebener „Tiefschweißeffekt“ wurde bisher nicht beobachtet.



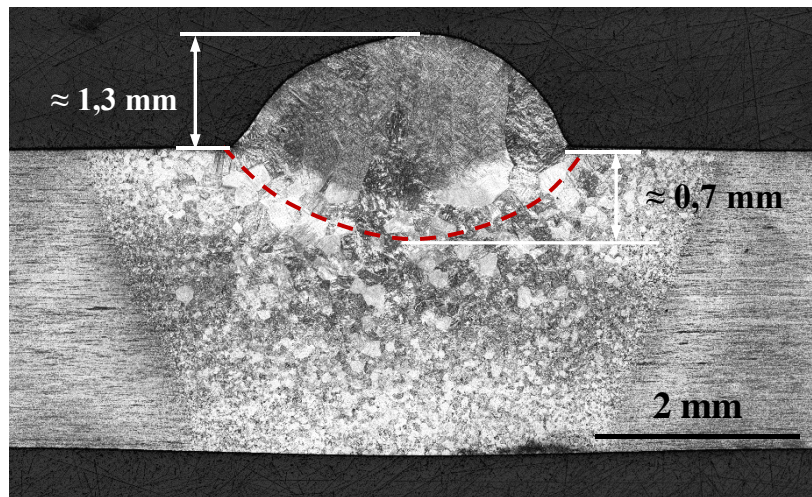


Abb. 8: Auftragschweißung im Querschliff, TiC-geimpft

Eine signifikante Verringerung der primären Korngröße im Bereich der SZ lässt sich an den Querschliffen nicht erkennen. Voruntersuchungen zeigen jedoch, dass mit einer deutlich feineren Struktur des (Sekundär-)Gefüges innerhalb der Körner zu rechnen ist.

#### 4 Zusammenfassung

Der Einfluss auf das Erstarrungsverhalten und Schweißgefüge von Auftragsnähten an TiAl6V4 durch direktes Überschweißen definiert aufgebrachtter Impfmittelschichten konnte erfolgreich nachgewiesen werden. Deutliche Effekte zeigen sich in den unterschiedlich ausgebildeten Schmelzbadgeometrien. Hier kann durch eine entsprechende Prozessführung der Bereich der Schmelz- und Wärmeeinflusszone eingeschränkt und damit eine begrenzte Werkstoffbeeinflussung bzw. Schädigung erreicht werden. Eine kornfeinende Wirkung der Impfmittelsubstanzen auf das Gefüge der Schmelzzone konnte zunächst nicht nachgewiesen werden. Die als heterogene Keimbildner beigegeben Partikel führten damit zu keiner signifikanten Verringerung der Primärkorngröße in der SZ. In weiteren Untersuchungen muss sich zeigen, inwieweit ggf. eine Feinung des Sekundärgefüges innerhalb der Schmelzzone erreicht werden konnte oder ob möglicherweise eine effektneutralisierende Zersetzung der hochschmelzenden Partikel im Lichtbogen stattgefunden hat.



## **Danksagung**

Die Autoren bedanken sich bei der Deutschen Forschungsgemeinschaft, die die Arbeiten im Teilprojekt B6 "Lichtbogenschweißen von Titanlegierungen" des Sonderforschungsbereichs 871 "Regeneration komplexer Investitionsgüter" fördert.

## **Literatur**

- [1] Azar, P.; Ping, L.; Patnaik, P. C.; Thamburaj, R.; Immarigeon, J-P.: Electron Beam Weld Repair and Qualification of Titanium Fan Blades for Military Gas Turbine Engines, Proceedings of RTO AVT Specialists' Meeting on "Cost Effective Application of Titanium Alloys in Military Platforms", published in RTO-MP069 (II), 2001
- [2] Gil, F.J.; Ginebra, M. P.; Manero, J. M.; Planell, J. A.: Formation of alpha-Widmanstätten structure: effects of grain size and cooling rate on the Widmanstätten morphologies and on the mechanical properties in Ti6Al4V alloy, Journal of Alloys and Compounds, Vol. 329, 142-152, 2001
- [3] Achebo, J. I.; Ibadode, A. O. A.: Determination of Optimum Welding Flux Composition using the Bend Strength Test Technique, Advanced Materials Research, Vols. 62-64, 393-397, 2009
- [4] Sundaresan, S., u. G. D. Janaki Ram: Use of arc oscillation for grain refinement of gas tungsten arc welds in alpha-beta titanium alloys. Science and Technology of Welding and Joining, Vol. 4, No. 3, 88-100, 1999
- [5] Kishore Babu, N.; Ganesh Sundara Raman, S.: Correlation of microstructure with mechanical properties of TIG weldments of Ti-6Al-4V made with and without current pulsing, Materials Characterization 58, 581-587, 2007
- [6] Hallum, D. L.; Baeslack, W. A.: Nature of grain refinement in titanium-alloy welds by microcooler inoculation. Welding Journal. 69, 326-336, 1990
- [7] Terasaki, H.; Komizo, Y.; Saiki, K.: Development of Titanium Weld Metal Reinforced by Titanium Mono-boride, ISIJ International, Vol. 48, 624-627, 2008
- [8] Bach, Fr.-W.; Versemann, R.; Stoll, P.; Krüssel, T.; Bruns, C.: Theoretical and practical aspects of seeding technology for fusion welding, Materialwissenschaft und Werkstofftechnik, Vol. 44, 70-78, 2013

### **Autorenanschriften**

Dipl.-Ing. Demian Langen  
Leibniz Universität Hannover  
Institut für Werkstoffkunde  
An der Universität 2  
30823 Garbsen  
Telefon: 0511-7629836  
Telefax: 0511-7629899  
E-Mail: [langen@iw.uni-hannove.de](mailto:langen@iw.uni-hannove.de)

Dipl.-Ing. Mark A. Swider  
Leibniz Universität Hannover  
Institut für Werkstoffkunde  
An der Universität 2  
30823 Garbsen  
Telefon: 0511-7629839  
Telefax: 0511-7629899  
E-Mail: [swider@iw.uni-hannove.de](mailto:swider@iw.uni-hannove.de)

Dr.-Ing. Thomas Hassel  
Leibniz Universität Hannover  
Institut für Werkstoffkunde  
An der Universität 2  
30823 Garbsen  
Telefon: 0511-7629813  
Telefax: 0511-7629899  
E-Mail: [hassel@iw.uni-hannove.de](mailto:hassel@iw.uni-hannove.de)